

Protokoll: Solarzelle

Tom Kranz, Philipp Hacker

18. November 2014

Betreuer: J. Walowski
Versuchsdatum: 4./5.11.2014

Note:

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Physikalische Grundlagen	2
2.1	Silizium als Halbleiter	2
2.1.1	Dotiertes Silizium	3
2.2	Funktionsweise der Solarzelle	4
2.2.1	Qualität einer Solarzelle	4
2.2.2	Strom-Spannungscharakteristik	4
3	Durchführung	5
4	Auswertung	5
5	Anhang	9
5.1	Messwerte	9
6	Quellen	11

1 Einleitung

Der weltweit 2013 in der Photovoltaik erzeugte Solarstrom reichte aus, um einen Energieverbrauch von 139 GWh abzudecken. 2008 wurde nach Deutschland mehr Technik für die Photovoltaik importiert, als national hergestellt wurde. Unsere Wirtschaft zählt zu den größten Solarmodulproduzenten weltweit. Vor bereits 4 Jahren lag die in Deutschland *installierte Leistung* bei 9760 MW. Die Bedeutung der Solarzelle im Hinblick auf die aktuelle Energiesituation wächst somit ständig an.

In diesem Versuch sollen die Eigenschaften einer Silizium-Solarzelle untersucht werden. Es handelt sich hierbei um ein aktives, dotiertes Halbleiter-Bauelement, welches seine Charakteristiken je nach der Intensität und Energie der Beleuchtung verändert. Im speziellen geht es dabei um die Umwandlung von Strahlungsenergie in elektrische Energie über den *inneren photoelektrischen Effekt*.

2 Physikalische Grundlagen

2.1 Silizium als Halbleiter

Silizium besitzt 4 Valenzelektronen, welche im Festkörper spingekoppelte, kovalente Bindungen mit Nachbaratomen ausbilden. Die Elementarzelle des **Si** bildet einen Tetraeder, wobei die Kantenlänge der Zelle und somit die Gitterkonstante des Kristalls $a_{\text{Si}} = 5,43 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ beträgt. Dieser kleinste wiederkehrende Würfel enthält 8 **Si**-Atome.

Halbleiter charakterisieren sich allgemein durch eine Lücke ΔE zwischen den Energiezuständen ihrer Valenzelektronen. Für $T = 0 \text{ K}$ sind Halbleiter Isolatoren, da ihre *Bandlücke* zu groß wird und die Valenzelektronen nicht die Energie besitzen, diese *verbotene Zone* zu überwinden. Für $T > 0 \text{ K}$ können einige dies jedoch, wobei sie Defektelektronen (*Quasiteilchen*) hinterlassen. Aus dem Valenzband von Nachbaratomen gelöste Teilchen können damit rekombinieren, womit ein Ladungsstrom aus den positiven Quasiteilchen der „Löcher“ und den angeregten Elektronen entsteht. **Si** wird zum elektrischen Leiter.

Der Rekombinationsprozess erfolgt außerdem unter der Abgabe von Impuls an das Kristallgitter. Die daraus resultierende Gitterschwingung kann ebenso durch die Emission eines weiteren *Quasiteilchens*, des Phonons, dargestellt werden. Diese sind für den Ladungsstrom jedoch irrelevant.

In Halbleitern ist die verbotene Zone also klein genug, dass Wärmeschwingungen (auch Lichtabsorption) ausreichen, damit Valenzelektronen angeregt und in ihrem Niveau angehoben werden können. Das heißt: Halbleiter haben eine intrinsische elektrische Leitfähigkeit.

Sei nun die bei einer Temperatur T vorliegende Dichte von negativen bzw. positiven Ladungsträgern η und ρ , sowie die Beweglichkeit der jeweiligen Teilchen μ_η und μ_ρ . Dann gilt für die Leitfähigkeit σ :

$$\sigma = e \cdot (\eta \cdot \mu_\eta + \rho \cdot \mu_\rho)$$

(e - Elementarladung). Schließlich lässt sich auch die Dichte n der zur Leitung beitragenden, quasifreien Elektronen berechnen. Hierzu benutzt man die *Fermi-Verteilung* $f(\varepsilon)$ für eine

Energie der Teilchen $E_{e^-} = E_{\text{Leitung}} + \varepsilon$. Es folgt für die n und die Zustandsdichte N :

$$n = 4\pi \left(\frac{2m_e}{h^3} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \int_0^\infty f(\varepsilon) \sqrt{\varepsilon} d\varepsilon = 2 \left(\frac{2\pi m_e k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot e^{\left(-\frac{\Delta E}{2k_B T}\right)} = N \cdot e^{\left(-\frac{\Delta E}{2k_B T}\right)}$$

(m_e - Elektronenmasse; h - Planck-Konstante, k_B - Boltzmann-Konstante). Im undotierten Halbleiter gilt im Allgemeinen für die Eigenleitungsdichte $n = n_i = n_{\text{Leitung}} = n_{\text{Defekt}}$.

2.1.1 Dotiertes Silizium

Bringt man in den Festkörper des Silizium Fremdatome mit $k \neq 4$ Valenzelektronen, so verändern sich die Bandlücke und Fermi-Energie E_F dahingehend, dass sie sich je nach Wert von k verkleinern oder vergrößern. Dies entspricht der künstlichen Veränderung der Dichten η bzw. ρ durch Einbringen von „Löchern“ mit Akzeptoren oder Elektronen mit Donatoren (zB-sp.: $k = 5$ **As**; $k = 3$ **Al**). Für $k = 5$ liegt n-dotiertes Material vor und E_F steigt. Mit $k = 3$ sinkt für p-dotiertes Silizium die Fermi-Energie. Das Quadrat der Eigenleitungsdichte n_i ist in jedem Fall gleich groß.

Die durch die Temperaturbewegung und den Unterschied in den Energien auftretenden Potentialdifferenz lässt sich durch 2 Spannungen ausdrücken: U_T und $U_{\Delta E}$. Für Silizium ist $\Delta E = 1,12$ eV. Die Ladungsträgerdichte lässt sich damit umschreiben.

$$U_{\Delta E} = \frac{\Delta E}{e} \quad U_T = \frac{k_B T}{e}$$

$$n = N(T) \cdot e^{-\left(\frac{U_{\Delta E}}{2U_T}\right)}$$

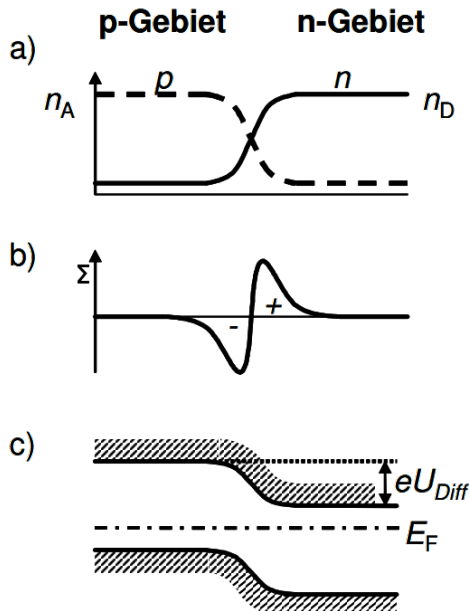


Abb. 1: a) Konzentrationen
b) Übergang
c) Bänder-„Knick“

An einem Übergang von p- zu n-dotiertem Material (und entgegengesetzt) stellt sich ein Diffusionsstrom ein, da der Gradient der jeweiligen Ladungskonzentrationen n_η und n_ρ nicht null ist. Das heißt, dass ein Konzentrationsgefälle für das „Wandern“ von Elektronen und Löchern entgegen des jeweiligen Gradienten verantwortlich ist.

Die von der Diffusion erzeugten Raumladungszonen der Ladung Σ (siehe Abb. 1)- Elektronen hinterlassen Defekte und umgekehrt - bauen ein elektrisches Feld auf, welches der Ursache entgegenwirkt. Die Größe des Übergangs kann somit im thermischen Gleichgewicht nicht beliebig anwachsen. Die beschriebene Diffusionsspannung wird folgendermaßen eingeschränkt:

$$U_L \leq U_{\text{Diff}} = U_T \ln \left(\frac{n_\eta \cdot n_\rho}{n_i^2} \right) \leq U_{\Delta E}$$

Hierbei ist U_L die maximale Spannung die anliegt, wenn kein Verbraucher an der Solarzelle angeschlossen ist.

2.2 Funktionsweise der Solarzelle

Durch Absorption von elektromagnetischer Strahlung werden im Halbleiter freie Ladungsträger erzeugt (innerer Photoeffekt). Durch das von den pn-/np-Übergängen erzeugte innere elektrische Feld sorgt dafür, dass es einen gerichteten Ladungsstrom gibt.

Minoritätsladungen aus einer dünnen, absorbierenden Siliziumschicht können in die darunterliegende Raumladungszone eines Übergangs diffundieren. Das dort vorliegende Feld trennt diese von den Majoritätsladungen der Absorptionsschicht. Dadurch entsteht ein Strom von, aus der sogenannten Basis diffundierten, Elektronen zwischen den Kontakten der in Reihe geschalteten Übergänge. Die damit einher gehende Spannung ist die Leerlaufspannung U_L . Ein Teil der Diffusionsladungen rekombiniert noch bevor sie zum Strom beitragen können. Die freiwerdende Energie äußert sich durch Erwärmung der Zelle.

2.2.1 Qualität einer Solarzelle

Die Leistung einer Solarzelle hängt natürlich, neben den externen Faktoren, auch von ihrem internen Aufbau und damit ihrer Charakteristik als elektrisches Bauteil ab. Es können geeignete Größen für genau diesen Zweck eingeführt werden. Der Füllfaktor **FF** ist das Verhältnis aus maximaler Leistung zum Produkt aus U_L und I_{Photo} (siehe Abb. 3). Als Spannungsfaktor **SF** bezeichnet man den Quotienten aus U_L und $U_{\Delta E}$. Das Produkt von beiden ergibt schließlich den charakteristische Faktor **CF**.

2.2.2 Strom-Spannungscharakteristik

Eine Solarzelle ist eine (Photo-)Diode, welche aufgrund des inneren Photoelektrischen Effektes aus elektromagnetischer Strahlung einen gerichteten Strom erzeugt. Der Strom der Zelle kann genähert als Summe aus einem Strom durch das Bauteil Diode I_D und einen von der Leerlaufspannung getriebenen Strom I_{Photo} betrachtet werden (siehe Abb. 2).

$$I_{\text{Sol}} = I_D - I_{\text{Photo}}$$

$$I_D = I_{\text{sat}} e^{\left(\frac{U}{U_T} - 1\right)} \quad I_{\text{Photo}} = \eta_{\text{Photo}} \cdot \frac{\lambda e}{h \cdot c} \cdot P_{\text{opt}}$$

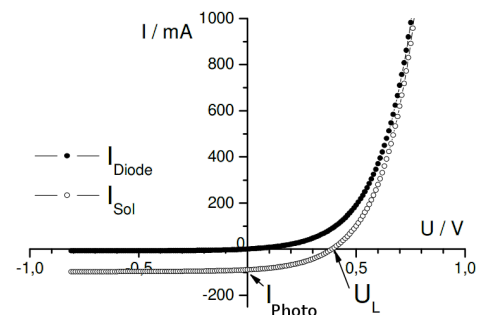


Abb. 2: Vergleich Diode-Solarzelle

(I_{sat} - Sättigungsstrom; P_{opt} - optische Leistung; $E = \frac{hc}{\lambda}$ - eingestrahlte Energie; η_{opt} - Wirkungsgrad)

Unbeleuchtet folgt der Strom-Spannungsverlauf der Solarzelle dem einer Diode (siehe Abb. 2). Beleuchtet man hingegen eine unbeschaltete Zelle, so sieht man $I_{\text{sol}}(U_L) = 0$ wegen der Aufladung der Ladungszonen der dotierten Gebiete.

Schließt man die Solarzelle kurz und beschaltet sie mit einem Signal $U \neq 0$, so rekombinieren die Ladungen des Signals und des Leerlaufstroms miteinander. Die U - I -Kennlinien der Diode und der Solarzelle gleichen sich damit im Betrieb an.

Für den Photo-Strom gilt, dass sowohl die Photonenenergie als auch der Wirkungsgrad von der Wellenlänge abhängen. Offensichtlich muss, aufgrund der Quantisierung der Energien für die Zustände und der Photonen $E_{\text{opt}} \geq \Delta E$ gelten.

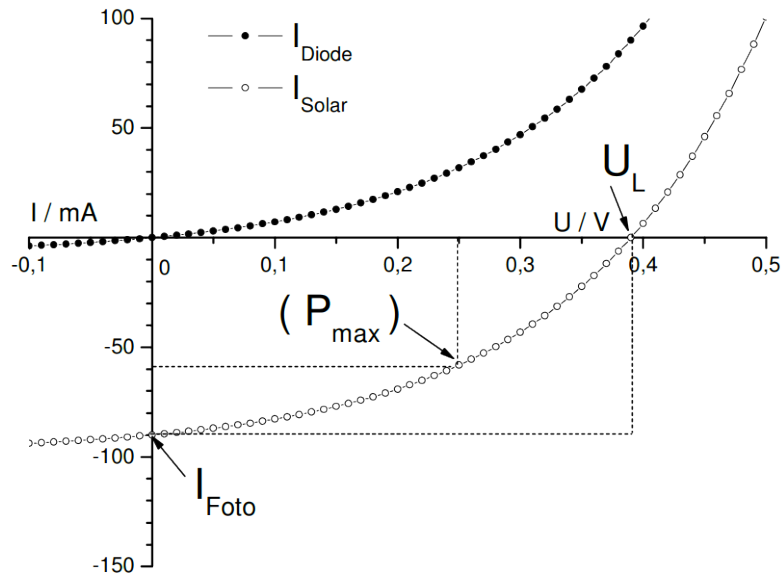


Abb. 3: maximale Leistung und Photo-Strom der Solarzelle

3 Durchführung

Mit Hilfe von Spannungs- und Strommessgeräten wird eine einfache Solarzelle untersucht. Eingangs betrachtet man das unbeleuchtete Bauteil. Durch eine externe Spannungsquelle wird ein nicht zu großer Bereich von Spannungen generiert und an die Zelle angeschlossen. Der Zusammenhang von Spannung und dem Strom durch den Halbleiter wird aufgenommen. Ebenso wird für Licht verschiedener Farben, Strahler und Intensitäten verfahren.

Schließlich bestrahlt man die Solarzelle mit einer 120 W Lampe und belastet sie mit Dekaden-Widerständen. Hierbei wird ebenso eine Strom-Spannungscharakteristik verfolgt. Gleiches wird für Tageslicht unternommen.

4 Auswertung

Als erstes haben wir die Strom-Spannungs-Kennlinie der unbeleuchteten Solarzelle mithilfe einer angeschlossenen Spannungsquelle aufgenommen und festgestellt, dass sie sich in diesem Zustand exakt wie eine Diode verhält. Dann haben wir sie, abgeschirmt vom Umgebungslicht, mit LEDs unterschiedlicher Farben beleuchtet und die Kennlinien in diesen Zuständen aufgenommen. Die Messwerte dazu lassen sich in den Tabellen 3, 5 und 7 einsehen und wurden in der Abb. 4 dargestellt, sowie an eine Funktion der Form

$$I(U) = I_S \cdot (\exp(U \cdot U_T^{-1}) - 1) - I_F \quad (1)$$

mittels nichtlinearer Methode der kleinsten Quadrate in den Parametern I_S , U_T angepasst. Den Parameter I_F haben wir aus den Messwerten abgelesen.

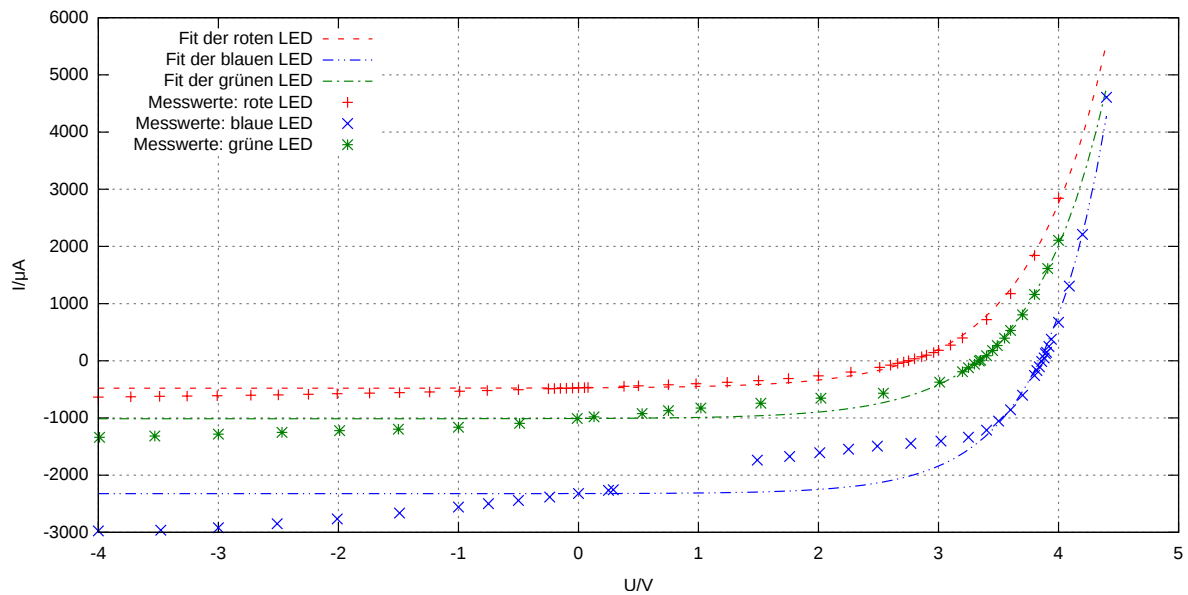


Abb. 4: Diagramm: Beleuchtung mit LEDs

Nach dieser Messung haben wir anstelle der Spannungsquelle einen ohmschen Dekadenwiderstand (eine Last) geschaltet und unter Veränderung des Widerstands den Strom und die Spannung gemessen. Diese Messwerte wurden in den Tabellen 4 und 6 zusammengetragen und in Abb. 5 veranschaulicht und wie zuvor an eine Funktion angepasst. Man sieht bereits im Diagramm die starke Abweichung der Messwerte der roten LED von der angepassten Kurve, was sich auch in den Fit-Parametern ausdrückt, die Größenordnungen von den übrigen Werten entfernt sind. Diese Messung wird demnach in den folgenden Betrachtungen der Vollständigkeit halber mit aufgeführt, aber ansonsten ignoriert.

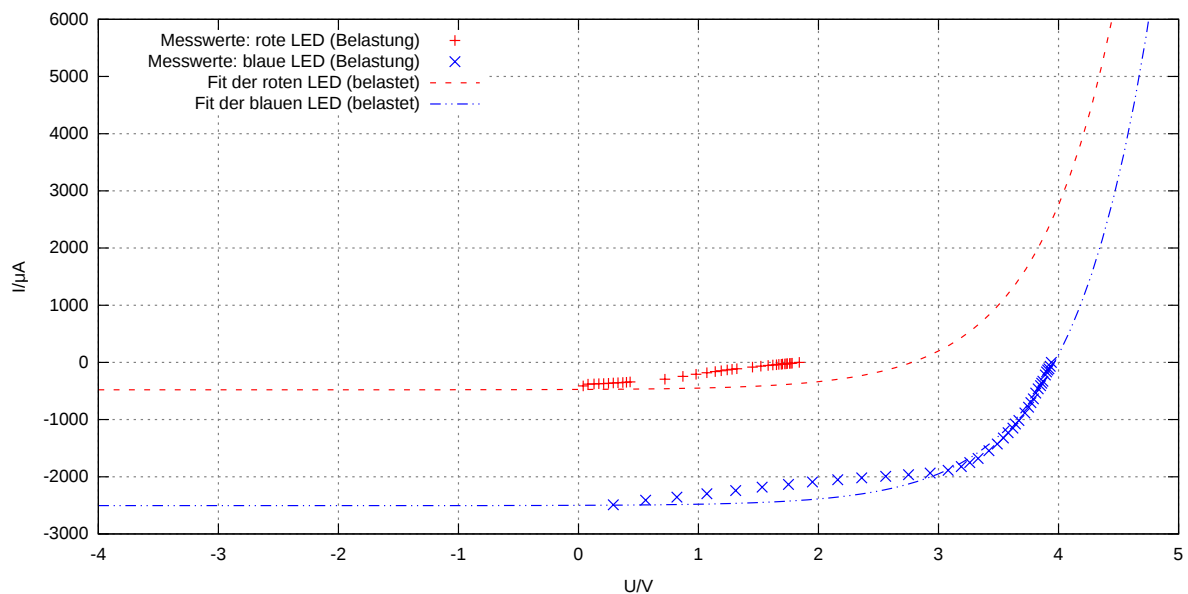


Abb. 5: Diagramm: LEDs unter Belastung

Gleiches wurde bei Beleuchtung durch eine starke Glühlampe und unter Sonneneinstrahlung getan, die Messwerte dazu finden sich in 8 bis 10 und das zugehörige Diagramm ist Abb. 6.

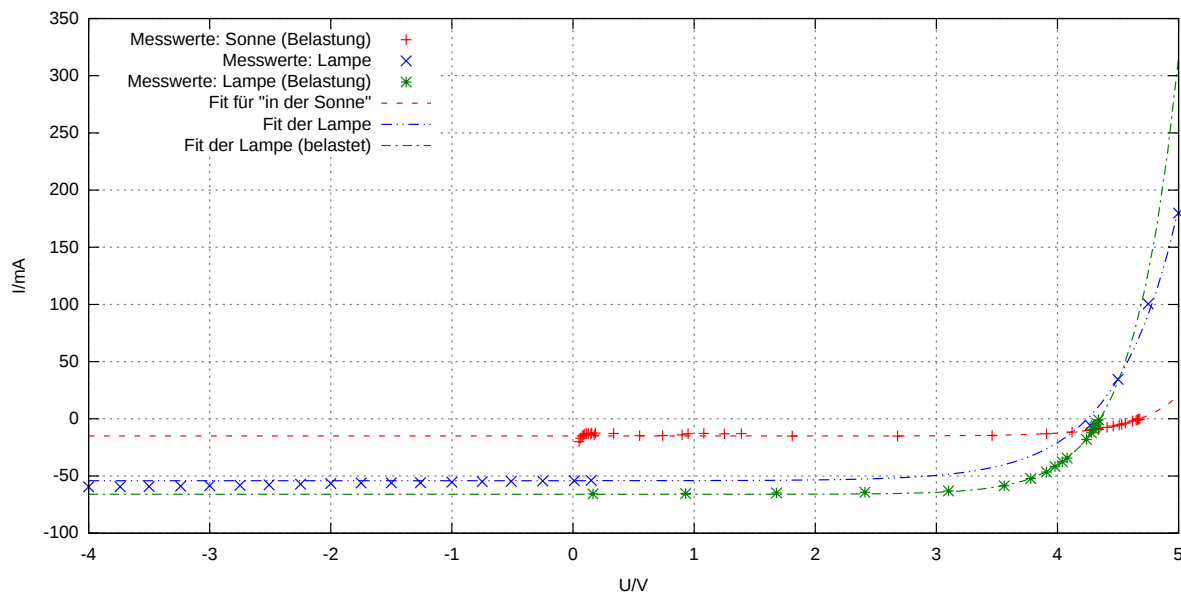
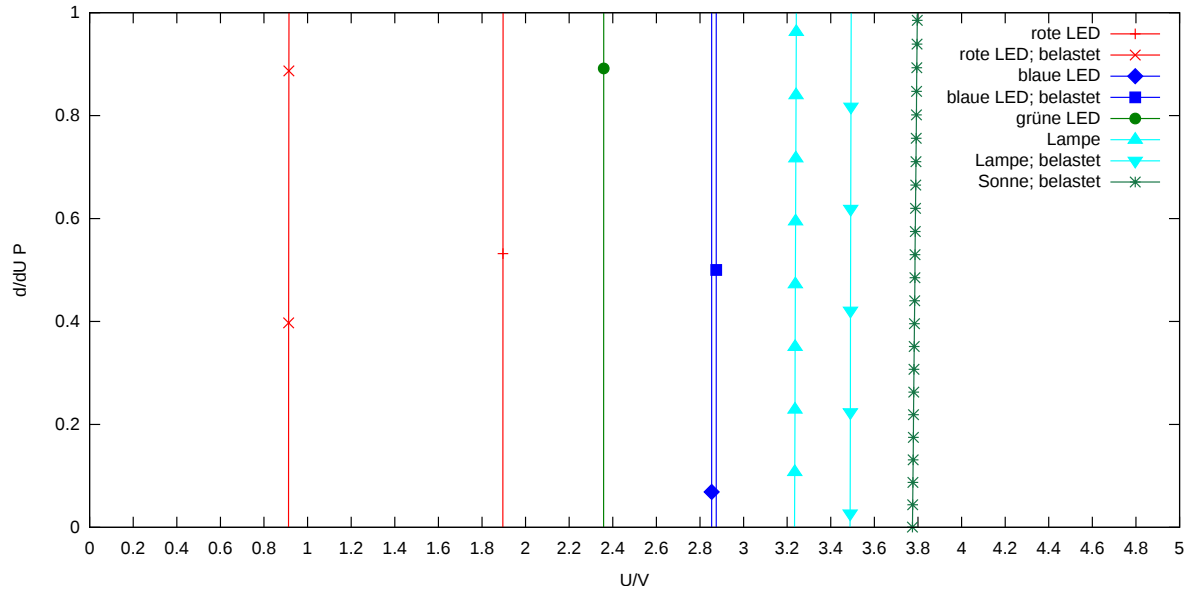


Abb. 6: Diagramm: Sonne und Lampe

Durch den Vergleich der Beziehungen über Fotostrom und den Strom durch die Solarzelle mit den Strom-Spannungs-Charakteristiken fällt sofort auf, dass η_{opt} stark von λ , also der Art der Beleuchtung, abhängen muss. I_F wächst bei fallender Wellenlänge an. Weiterhin beeinträchtigenden Schwankungen in der Temperatur die Güte der Messung. Besonders in Abb. 4 ist die Diskrepanz zwischen exponentieller Form und der gemessenen Kurve im dritten Quadranten gut zu erkennen. Dort könnte der Strom eine Erwärmung und damit eine in der Funktion nicht berücksichtigte Schwankung der Parameter hervorgerufen haben.

Entgegen der Theorie, in welcher die Charakteristiken von belasteter und unbelasteter Solarzelle für gleiche Beleuchtungen zusammenfallen, konnte kein solches Verhalten beobachtet werden. Jedoch finden wir bemerkenswert, dass sämtliche Fit-Parameter (bis auf die bereits genannte Ausnahme) ungefähr in der selben Größenordnung liegen. Die Messungen mit der blauen LED und der Lampe haben in den charakteristischen Faktoren (Tabelle 2) sogar eine recht gute Übereinstimmung.

Die maximal nutzbare Leistung haben wir durch die Ableitung der Leistung $P = I \cdot U$ nach der Spannung festgestellt. Dafür haben wir die in den Fits erhaltenen Funktionen $I(U)$ benutzt. Da die analytische Lösung der Gleichung $\frac{dP}{dU} = 0$ sich als schwierig erweist und bei unserer Messgenauigkeit auch keinen Vorteil gegenüber einer grafischen Lösungsmethode bringt, haben wir die Funktion $\frac{dP}{dU}$ in einem kleinen Bereich um 0 A aufgetragen und den Nulldurchgang abgelesen. Diese Spannung konnten wir nun wiederum in $I(U) \cdot U$ einsetzen, um die maximale Leistung zu berechnen – die Ergebnisse sind auch in Tabelle 1 eingetragen. Sowohl die Nulldurchgänge der Leistungsableitung, als auch die daraus berechneten Maximalleistungen, liegen bei den unter Last und mit der Spannungsquelle vorgenommenen Messungen dicht beieinander.



Bedingungen	$I_s / \mu\text{A}$	U_T^{-1} / V	$I_F / \mu\text{A}$	U_L / V	$P_{\max} / \mu\text{W}$
rote LED	6,281	1,560	473,0	2,777	-412,491
blaue LED	1,770	1,869	2322,0	3,841	-5584,089
grüne LED	4,544	1,625	1009,0	3,327	-1895,289
rot; belastet	$1,0814 \cdot 10^4$	0,021	440,0	1,815	39,619
blau; belastet	5,221	1,556	2500,0	3,966	-5885,519
Lampe	12,6	1,968	$5,41 \cdot 10^4$	4,248	$-1,512 \cdot 10^5$
Lampe; belastet	0,485	2,715	$6,6 \cdot 10^4$	4,353	$-2,082 \cdot 10^5$
Sonne; belastet	$6,18 \cdot 10^{-2}$	2,649	$1,5 \cdot 10^4$	4,679	$-5,147 \cdot 10^4$

Tabelle 1: Fitparameter und maximale Leistung für Abb. 4 bis Abb. 6

Bedingungen	FF	SF	CF
rote LED	-0,3139	2,479	-0,778
blaue LED	-0,626	3,429	-2,147
grüne LED	-0,564	2,970	-1,677
rot; belastet	0,0495	1,621	0,08039
blau; belastet	-0,593	3,541	-2,101
Lampe	-0,657	3,793	-2,495
Lampe; belastet	-0,724	3,887	-2,817
Sonne; belastet	-0,733	4,178	-3,063

Tabelle 2: Charakteristische Faktoren der Solarzelle

5 Anhang

5.1 Messwerte

U / V	$I / \mu\text{A}$	U / V	$I / \mu\text{A}$	U / V	$I / \mu\text{A}$	U / V	$I / \mu\text{A}$
-4,00	-636	-0,99	-533	0,50	-438	2,75	2
-3,73	-629	-0,76	-521	0,75	-420	2,80	34
-3,49	-622	-0,50	-506	0,98	-401	2,86	70
-3,26	-617	-0,25	-490	1,24	-377	2,90	99
-3,01	-610	-0,20	-486	1,50	-347	2,96	143
-2,73	-602	-0,15	-484	1,75	-311	3,00	182
-2,50	-596	-0,10	-481	2,00	-263	3,10	273
-2,25	-586	-0,05	-478	2,27	-198	3,20	398
-2,01	-576	0,00	-473	2,51	-116	3,40	719
-1,74	-566	0,05	-470	2,60	-77	3,60	1175
-1,49	-557	0,08	-467	2,66	-46	3,80	1843
-1,24	-545	0,38	-446	2,71	-22	4,00	2842

Tabelle 3: Messwerte bei Beleuchtung mit der roten LED

U / V	$I / \mu\text{A}$	$R / \text{k}\Omega$	U / V	$I / \mu\text{A}$	$R / \text{k}\Omega$	U / V	$I / \mu\text{A}$	$R / \text{k}\Omega$
0,04	-412	0	0,87	-244	3,	1,65	-40,4	35,
0,08	-380	0,1	0,98	-207	4,	1,67	-35,8	40,
0,13	-376	0,2	1,07	-180	5,	1,69	-32,2	45
0,17	-373	0,3	1,14	-160	6,	1,70	-29,2	50,
0,21	-370	0,4	1,19	-145	7,	1,72	-26,8	55,
0,25	-366	0,5	1,24	-132	8,	1,73	-24,6	60,
0,29	-360	0,6	1,28	-121	9,	1,74	-21,3	70,
0,33	-356	0,7	1,32	-112	10,	1,76	-18,8	80,
0,37	-351	0,8	1,45	-82,4	15,	1,77	-16,8	90,
0,40	-347	0,9	1,52	-65,3	20,	1,78	-15,2	100,
0,43	-341	1,	1,58	-54,2	25,	1,84	0,00	$\approx \infty$
0,72	-294	2,	1,62	-46,2	30,			

Tabelle 4: Messwerte bei Beleuchtung mit der roten LED unter angegebener Belastung

U / V	$I / \mu A$	U / V	$I / \mu A$	U / V	$I / \mu A$	U / V	$I / \mu A$
-4,00	-2976	0,00	-2322	3,25	-1337	3,89	126,3
-3,48	-2962	0,25	-2266	3,40	-1213	3,90	149
-3,00	-2919	0,29	-2255	3,50	-1054	3,92	250
-2,51	-2850	1,49	-1738	3,60	-857	3,94	377
-2,01	-2766	1,76	-1673	3,70	-603	4,00	672
-1,49	-2663	2,01	-1607	3,80	-257	4,09	1306
-1,00	-2557	2,25	-1547	3,82	-171	4,20	2211
-0,75	-2498	2,49	-1492	3,84	-105	4,40	4608
-0,50	-2442	2,77	-1445	3,86	-11,6		
-0,24	-2383	3,02	-1404	3,88	50		

Tabelle 5: Messwerte bei Beleuchtung mit der blauen LED

U / V	$I / \mu A$	$R / k\Omega$	U / V	$I / \mu A$	$R / k\Omega$	U / V	$I / \mu A$	$R / k\Omega$
0,29	-2490	0	3,08	-1888	1,3	3,77	-703	4,5
0,56	-2410	0,1	3,19	-1822	1,4	3,79	-637	5,
0,82	-2356	0,2	3,26	-1751	1,5	3,81	-536,7	6,
1,07	-2297	0,3	3,33	-1679	1,6	3,83	-463,4	7,
1,31	-2242	0,4	3,42	-1545	1,8	3,85	-407,7	8,
1,53	-2181	0,5	3,49	-1426	2,	3,86	-363,8	9,
1,75	-2134	0,6	3,54	-1322	2,2	3,87	-328,0	10,
1,95	-2091	0,7	3,58	-1230	2,4	3,89	-220,9	15,
2,16	-2053	0,8	3,62	-1149	2,6	3,90	-166,3	20,
2,36	-2020	0,9	3,64	-1078	2,8	3,91	-133,5	25,
2,56	-1992	1,	3,67	-1015	3,	3,92	-111,4	30,
2,75	-1963	1,1	3,72	-885	3,5	3,93	-67,0	50,
2,93	-1935	1,2	3,75	-784	4,	3,94	0,00	$\approx \infty$

Tabelle 6: Messwerte bei Beleuchtung mit der blauen LED unter angegebener Belastung

U / V	$I / \mu A$	U / V	$I / \mu A$	U / V	$I / \mu A$	U / V	$I / \mu A$
-3,99	-1338	-0,01	-1010	3,01	-375	3,49	267
-3,53	-1315	0,13	-980	3,20	-192	3,55	394
-3,00	-1283	0,53	-924	3,25	-122	3,60	531
-2,47	-1252	0,75	-871	3,30	-59	3,70	804
-1,99	-1222	1,02	-827	3,34	-4,2	3,80	1159
-1,50	-1197	1,52	-742	3,35	11,3	3,91	1614
-1,00	-1162	2,02	-653	3,40	87,5	4,00	2107
-0,49	-1094	2,54	-568	3,45	179		

Tabelle 7: Messwerte bei Beleuchtung mit der grünen LED

U / V	I / mA	U / V	I / mA	U / V	I / mA	U / V	I / mA
5,00	179,8	-0,25	-54,38	-1,75	-56,12	-3,24	-58,83
4,75	100,5	-0,51	-54,66	-2,00	-56,60	-3,50	-59,17
4,50	34,5	-0,75	-54,93	-2,25	-57,08	-3,74	-59,41
4,27	-5,71	-1,00	-55,34	-2,51	-57,78	-4,00	-59,51
0,15	-53,85	-1,26	-55,85	-2,75	-58,12		
0,01	-54,10	-1,50	-56,00	-3,00	-58,47		

Tabelle 8: Messwerte bei Beleuchtung mit der Lampe

U / V	I / mA	$R / \text{k}\Omega$	U / V	I / mA	$R / \text{k}\Omega$	U / V	I / mA	$R / \text{k}\Omega$
0,165	65,7	0	3,78	52,28	0,06	4,28	12,15	0,3
0,93	65,4	0,01	3,91	46,52	0,07	4,30	9,20	0,4
1,68	64,8	0,02	3,98	41,69	0,08	4,31	7,38	0,5
2,41	64,2	0,03	4,04	37,62	0,09	4,32	6,16	0,6
3,10	63,1	0,04	4,08	34,34	0,1	4,33	4,63	0,8
3,56	58,6	0,05	4,24	18,04	0,2	4,34	0,91	4

Tabelle 9: Messwerte bei Beleuchtung mit der Lampe unter angegebener Belastung

U / V	$I / \mu\text{A}$	R / Ω	U / V	I / mA	R / Ω	U / V	I / mA	R / Ω
0,05	20,0	0	0,55	14,8	30	4,27	10,32	350
0,063	17,0	1	0,74	14,7	40	4,34	9,21	400
0,075	15,0	2	0,90	14,0	50	4,41	7,47	500
0,088	14,0	3	0,95	13,0	60	4,46	6,32	600
0,098	13,2	4	1,08	12,8	70	4,51	5,47	700
0,111	12,9	5	1,25	13,1	80	4,53	4,81	800
0,126	12,8	6	1,39	12,9	90	4,56	3,87	1000
0,147	13,3	7	1,81	15,1	100	4,62	1,96	2000
0,154	12,5	8	2,68	15,1	150	4,65	1,31	3000
0,174	14,3	9	3,46	14,7	200	4,66	0,78	5000
0,185	12,5	10	3,91	13,1	250	4,67	0,394	10000
0,335	12,8	20	4,12	11,63	300	4,68	0,198	20000

Tabelle 10: Messwerte „in der Sonne“ unter angegebener Belastung

6 Quellen

<https://de.wikipedia.org/wiki/Solarzelle>

https://de.wikipedia.org/wiki/Erneuerbare_Energien

<https://de.wikipedia.org/wiki/Halbleiter>
Versuchsanleitung: Solarzelle; 2014